

# 基于 Matlab 的绕组磁动势仿真

李谦祥

(西门子电气传动有限公司, 天津 300384)

**摘要** 为使电动机获得理想的性能, 设计每一相绕组的合成磁动势应尽量接近正弦波以抑制谐波降低损耗。本文介绍绕组合成磁动势的基本原理, 提出基于 Matlab 的线圈磁动势谐波分析方法。通过 Matlab 仿真生成相绕组的合成磁动势, 并对磁动势进行傅里叶变换, 得到基波与谐波的幅值, 为合理的选择节距降低线圈的谐波含量提供依据。以 2 极、4 极的电动机为例进行仿真与试验, 仿真结果表明文中方法适用于电动机设计应用。

**关键词:** 线圈; 磁动势; 谐波分析

## Simulation of Coil Magnetic Motive Force based on Matlab

*Li Qianxiang*

(Siemens Electrical Drives Ltd., Tianjin 300384)

**Abstract** To make the motor obtain the ideal performance, the design of each phase winding's synthetic magnetic motive force should be as close as possible to the sine wave to suppress the harmonics and reduce the loss. The basic principle of synthesis of magnetic motive force and coil MMF harmonics analysis method based on the Matlab are proposed in this paper. Simulation of the force and FFT transform through Matlab are introduced. Get the amplitude of fundamental wave and harmonic wave. Provide the basis for reasonable selection of the pitch and reduce harmonic content of the coil. Taking 2 and 4 pole motor as an example, the simulation and experiment results show that the method is suitable for the design of motor.

**Keywords:** coil; magnetic motive force; harmonics analysis

绕组是电动机的主要部件, 感应于绕组中的电动势以及通过绕组中的电流产生电磁转矩, 传递电磁功率, 在电能与机械能的转化过程, 通过绕组来实现机电能量的转换。在一定的导体数下, 绕组的合成电动势和磁动势在波形上力求接近正弦形, 从而获得较大的基波电动势和磁动势, 尽量使谐波含量最少, 幅值最小<sup>[1]</sup>。

## 1 绕组研究方法

### 1.1 绕组的基本分析方法

#### 1) 相带划分法

把整个电动机铁心圆周的槽数, 划分成若干个相带, 每个相带的槽数为每极每相槽数, 依次命名 U、V、W, 每对极重复一次, 再按每相的正、负相带电流方向和节距进行端部连接和极间连接, 构成绕组。

#### 2) 合成磁动势图法

合成磁动势图用来分析绕组产生的合成磁动势, 可以直观地看出波形的好坏。三相绕组的合成磁动势包括基波磁动势和所有谐波磁动势。一些电动机制造厂家常要求设计者把所排列绕组的合成磁动势画出。合成磁动势图是根据槽电流的分布情况, 利用全电流定律把磁动势的波形曲线一次画出。

#### 3) 矢量图法

每个线圈通过电流时在线圈周围的空间产生一个磁动势, 可以作为一个向量, 矢量图可用来划分相带, 排列绕组, 分析绕组的对称性, 计算绕组系数。每个相带, 矢量越集中, 占有的电角度, 就越小; 绕组的分布系数就越大。由于电角度, 随不同的谐波次数而变化, 不同次的谐波, 相邻两槽间的矢量差也不同, 因此在计算不同的谐波绕组系数时需画出不同的槽矢量图。

#### 4) 谐波分析法

绕组的谐波分析通常有两种方式。先对各个线圈的矩形磁动势波采用傅里叶级数分析得出基波和各次谐波，称为谐波分析，然后分别把基波和各次谐波逐点相加，便可得到基波和各次谐波的合成磁动势。或者把线圈产生的矩形磁动势波逐点相加，所得合成磁动势乃是一个阶梯形波，然后进行谐波分析。此外还有槽号相位图法和复数解析法<sup>[2]</sup>。

#### 1.2 绕组的计算机分析方法

以上所述的方法来分析绕组需要大量的计算，应用计算机可以节省大量人力，提高效率和准确性。常用的计算机语言有 Fortran 和 C，但是对于矩阵运算或画图时，编程极其复杂。已有的绕组分析程序多采用数值计算的方法，输出结果往往是大量的数据，需要对数据进行再次分析。Matlab 的 M 语言具有简洁高效、丰富的科学运算和绘图功能，一条语句可以代替数条 C 程序，可以将实验数据和计算结果用图形显示出来，适用于计算及分析。本文在分析绕组磁动势原理的基础上，提出基于 Matlab 的合成磁动势波和傅立叶变换的谐波分析方法，比传统合成磁动势图法和谐波分析法计算简单直观。

### 2 绕组磁动势原理

#### 2.1 绕组系数

对整数槽绕组，每极每相下具有相等的槽数，每对极可构成一个单元电动机，磁动势为一阶梯形波，含有基波和一系列谐波。基波起主要作用，也称主波，整数槽绕组只存在非 2 倍和非 3 倍次的谐波，即 5、7、11、13、17 等高次谐波。其中 7、13、19、次谐波的相与相之间，仍差 120°，保持原来的相序；而 5、11、17、…次谐波相与相之间，差 -120°，改变了原来的相序。整数槽绕组存在  $v=6k+1$  次谐波， $k$  为任意整数。当  $k=0$  时， $v=1$  次波为主波， $k$  为正值时， $v$  为正值，即正序谐波， $k$  为负值时， $v$  为负值，即负序谐波。

$$k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

$$k_{p1} = \sin \left( \frac{y_1}{\tau} \times 90^\circ \right) \quad (2)$$

主波的分布系数  $k_{d1}$ 、节距系数  $k_{p1}$  如式 (1)、式 (2) 所示。绕组系数  $k_w$  等于两者相乘。 $y_1$  和  $\tau$  分别为节距和极距， $\alpha$  相邻两槽的电角度， $q$  为每极每

相槽数。 $v$  次谐波的分布系数、节距系数及绕组系数分别为式 (4)、式 (5)、式 (6) 所示。

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{z} \quad (3)$$

$$k_{dv} = \frac{\sin v \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}} \quad (4)$$

$$k_{pv} = \sin \left( v \frac{y_1}{\tau} \times 90^\circ \right) \quad (5)$$

$$k_{ww} = k_{dv} = k_{pv} \quad (6)$$

#### 2.2 单相绕组的磁动势

整距线圈的磁动势，对于  $N_c$  匝的 2 极的整距线圈，通有正弦电流时，电流  $i_c$  从线圈边 A 流出。从 X 流入，由于对称关系，产生两极磁场，由于铁心的磁位降可以忽略不计，所以线圈的磁动势  $N_c i_c$  将全部消耗在两个气隙内，若气隙为均匀，则气隙各处的磁动势值均应等于  $N_c i_c / 2$ ，再考虑到磁场的极性时，一个极下的磁动势  $f_c$ 。

$$\begin{cases} f_c = \frac{N_c i_c}{2} & -\frac{\pi}{2} \ll \theta_s \ll \frac{\pi}{2} \\ f_c = -\frac{N_c i_c}{2} & \frac{\pi}{2} \ll \theta_s \ll \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (7)$$

整距线圈在气隙内形成一个一正一负矩形分布的磁动势波，矩形的幅值等于  $N_c i_c / 2$ ，若槽内电流为集中，则磁动势波在经过再流线圈边时，将发生  $N_c i_c$  的跃变。把整距线圈所产生的周期性矩形磁动势波分解为基波和一系列奇次的空间谐波，基波幅值应为矩形波幅值的  $4/\pi$ ，基波磁动势可以写成式 (8)。

$$f_{c1} = \frac{\pi N_c i_c}{4} \cos \theta_s \quad (8)$$

#### 2.3 短距分布式绕组的磁动势

每个线圈产生的磁动势波，逐点相加，可得到极相组的合成磁动势。每个线圈匝数相等，通过电流相同，各个线圈具有相同的磁动势幅值，相加得到阶梯型波。每相的串联总匝数为  $N$ ，利用矢量运算，分布线圈基波磁动势引入分布因数  $k_{d1}$  节距因数  $k_{p1}$  来计算线圈分布的影响。

$$f_{\phi1} = \frac{\pi N i_{\phi1}}{4} k_{p1} k_{d1} \cos \theta_s \quad (9)$$

线圈所产生的矩形磁动势波中，除基波磁动势外，还有高次谐波磁动势。谐波磁动势幅值与主波磁动势幅值之比如式 (11) 所示。

$$f_{\phi v} = \frac{1}{v} \frac{\pi}{4} \frac{N i_{\phi l}}{2p} k_{wv} \cos v\theta_s \quad (10)$$

$$\frac{F_v}{F} = \frac{k_{wv}}{vk_w} \times 100\% \quad (11)$$

### 3 绕组合成磁动势的仿真

#### 3.1 整距线圈磁动势仿真

整距线圈的磁动势为一周期性矩形波，运用 Matlab 的 ones 函数或 square 函数模拟出整距线圈在电动机铁心圆周气隙内形成一个一正一负矩形分布的磁动势波的标幺值<sup>[3]</sup>。如图 1 所示。运用傅里叶函数对磁动势波进行频域变换。得到如图 2 所示的基波与高次谐波的分布。高次谐波相对基波的幅值比较明显。方波磁动势中含有大量奇次谐波，这将影响铁心的损耗，产生谐波转矩和噪声。因此在电动机设计中常采用短距、分布式绕组和斜槽等措施来改善磁势波形，减小谐波分量<sup>[4]</sup>。

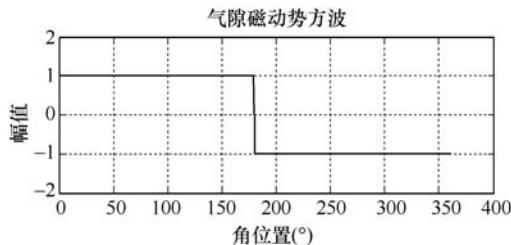


图 1 整距线圈的磁动势波

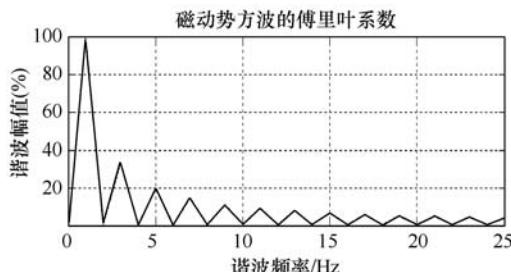


图 2 整距线圈的磁动势波频谱

#### 3.2 短距分布线圈磁动势仿真

由于各对极下磁势和磁阻组成一个对称的分支磁路，所以一相绕组的磁动势等于一个极相组的磁势。由于每个线圈在空间相差相邻槽的  $\alpha$  电角度，线圈为串联，各个线圈的匝数相同，且通过同一的电流，所以各个线圈的脉振磁势及其幅值均为相同，且在时间上具有同一变化规律。把每极下的线圈磁动势逐点相加，即可得到一个合成的阶梯形分布的磁势波，通过 Linspace 数组函数实现磁势的矢量运算。Matlab 的 M 语言合成磁动势算法流程图如图 3 所示。

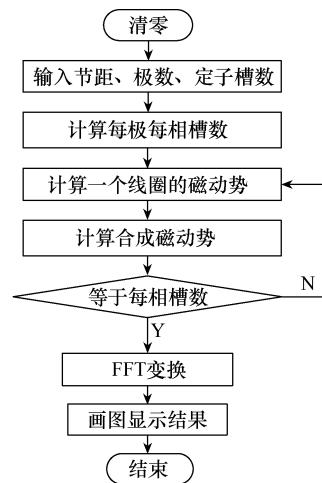


图 3 合成磁动势波算法程序流程图

短距分布的每个线圈产生的磁动势是一个阶梯形波，根据每个线圈在铁心圆周的位置，将一相绕组的所有线圈磁动势合成为近似正弦波。图 4 为一台 4 极，定子 48 槽，节距为 10 的电动机的一相绕组的合成磁动势。从图中可以看出磁动势波接近正弦，通过傅里叶变换得到图 5 中的基波与谐波分布，高次谐波幅值相对图 2 明显减小，可以看出较好的抑制了高次谐波。提高电动机的性能。

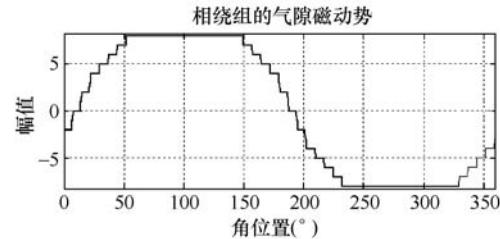


图 4 相绕组的磁动势波

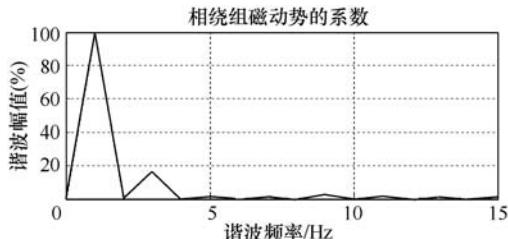


图 5 相绕组的磁动势波频谱

### 4 绕组磁动势仿真结果验证

对另一台 2 极的电动机绕组，定子为 42 槽，不同的节距情况下，5、7、9 次谐波相对基波的幅值进行计算。作为对比，采用绕组系数计算的方法，根据式（11）计算谐波相对基波的幅值，见表 1；用 Matlab 合成磁动势方法进行仿真分析，见表 2。

对比可见两种计算方法的计算结果基本一致，验证了文中提出方法的正确性。

表 1 绕组系数计算的谐波幅值

节距	5 次谐波 相对幅值/%	7 次谐波 相对幅值/%	9 次谐波 相对幅值/%
14	4.09	2.13	0.11
15	2.83	2.36	1.84
16	1.29	1.98	2.78
17	0.32	1.12	2.51
18	1.82	0.01	1.18

表 2 合成磁动势仿真计算谐波幅值

节距	5 次谐波 相对幅值/%	7 次谐波 相对幅值/%	9 次谐波 相对幅值/%
14	4.5	1.92	0.11
15	3.12	2.16	1.82
16	1.48	1.84	2.79
17	0.24	1.07	2.59
18	1.92	0.04	1.26

从表 2 可以看出在节距为 17 和 18 的时候谐波相对幅值明显减小。线圈节距的大小影响铁心磁密，铁耗与铁心磁密相关。此外定子绕组的磁势谐波磁场在转子绕组中感应电流引起附加损耗，在铁心表面引起表面损耗。运用标准电动机设计软件计算不同节距下的空载铁损和附加损耗的和进行对比分析。从图 6 可以看出在节距逐渐加大时损耗逐渐减小，与通过谐波幅值进行的判断基本一致，进一步验证了计算的准确性。

## 5 结论

Matlab 绘图功能的强大，同时图像可以更直观形象的表现电机的一些性质，有助于对电机的研究。

## New 新闻与动态

### 35kV 直挂式 SVG 主控制器 DSP 系统

近日，国家知识产权局公布专利“35kV 直挂式 SVG 主控制器 DSP 系统”，申请人为广东明阳龙源电力电子有限公司。

本发明公开了 35kV 直挂式 SVG 主控制器 DSP 系统，包括组态监控系统、PLC 和主控制器，该主控制器包括主控 DSP 和主控 FPGA，组态监控系统负责下发控制参数、整机保护设定值以及显示运行状态、故障；PLC 负

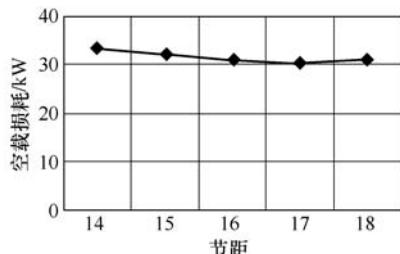


图 6 绕组的节距与空载损耗

本文总结了绕组研究内容和方法，提出基于 Matlab 合成磁动势波和谐波分析结合的绕组仿真分析方法，通过图形直观的显示计算结果，而不是生成大量的计算数据。模拟了不同的定子槽数，不同节距和极数的情况下，合成磁动势波的分布情况。利用傅里叶变换，得到基波谐波的相对幅值，为绕组设计提供直接的判据。以 2 极和 4 极电动机为例，仿真和实验结果对比证明，上述方法可以应用于绕组设计。

## 参考文献

- [1] Derya Ahmet Kocabas. Novel Winding and Core Design for Maximum Reduction of Harmonic Magnetomotive Force in AC Motors[J]. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 2009(2), VOL 45: 735-746.
- [2] 陈世元, 黄士鹏. 交流电机的绕组理论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 张志涌. 精通 Matlab R2011a[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [4] 汤蕴璆, 罗应立, 梁艳萍. 电机学[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.

## 作者简介

李谦祥 (1981-)，男，辽宁省丹东市人，硕士，工程师，主要从事电机电磁计算工作。

责整机运行流程；主控 DSP 负责组态监控系统、PLC 及主控 FPGA 之间的数据传送；主控 FPGA 负责完成采样、算法运算、PWM 脉冲生成及其保护。

本发明 35kV 直挂式 SVG 省去降压变，直接挂于 35kV 电网上，能够适应电网百兆级的快速动态补偿，调节长距离输电线路电压，降低输电损耗，提高输送能力并且提高暂态电压稳定水平，可广泛应用于风电站、光伏电站等。